

VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, Czech Republic

HORNICKO-GEOLOGICKÁ FAKULTA

INSTITUT GEOINFORMATIKY

Sledování změn reliéfu terénu radarovou interferometrií

Aplikace technik radarové interferometrie ve specifickém
poddolovaném území Ostravsko-karvinského revíru

Autoreferat
Ostrava, 2011

Ing. Milan Lazecky

Vedoucí práce:	doc. Ing. Petr Rapant, CSc.
Studijní program:	Geodézie a kartografie
Studijní obor:	Geoinformatika

Abstract

The main objective of this PhD thesis is to investigate an applicability of satellite synthetic aperture radar interferometry (InSAR) methods to perform a monitoring of terrain deformations in the region of Ostrava-Karviná district in Czech Republic. Cities in the region are affected by an intensive mining of a black coal for over 200 years. Character of the area, a velocity and spatial scale of the subsidence, are challenging the limits of InSAR. These limits were investigated, several optimizing scenarios were found to increase the performance of differential InSAR and multitemporal InSAR using C-band and L-band data to detect and estimate deformations due to subsidence and landslides in the region. While extents of subsidence troughs are often possible to delimitate, the deformation rates are usually underestimated. This was compared also to existing data from levelling. A strong potential can be seen in monitoring of slow deformations such as decay subsidence after a closure of mines. In Ostrava city, some subsidence of several mm/year was detected even 15 years after the closures in 1990s. For monitoring of a landslide in Doubrava, corner reflectors were designed but probably due to inappropriate installation on site their contribution couldn't be evaluated. In a conclusion, InSAR techniques were evaluated as appropriate for a systematic monitoring of a subsidence in the region. It can be used as a complementary technique to levelling measurements.

Key words: InSAR, subsidence, landslide, coal mining, undermining, ERS, Envisat, Alos, corner reflector.

Motivace

Jedním ze závažných problémů, se kterými se Moravskoslezský kraj potýká, jsou vlivy poddolování na Ostravsku a Karvinsku. V tomto regionu jsem strávil většinu svého života, a tak se mě regionální problémy týkají osobně. Vždy jsem se pokoušel využít příležitostí vedoucích v nějakou prospěšnou změnu. Tentokrát se mi naskytla příležitost podílet se na sledování poklesů vlivem poddolování, a to metodou, která dosud nebyla řádně prozkoumána, přinejmenším ne v Česku. V případě, že by se tato metoda družicového sledování potvrdila v regionálních podmínkách jako použitelná a dodávala by přesná vyhodnocení poklesů, mohla by korektně doplňovat nebo snad i nahradit ekonomicky či obecně náročnější metody sledování, jako jsou nivelační měření. Tento úkol jsem přijal s vírou v prospěšné činnosti a s jako takovou jsem pracoval svědomitě a úplně.

Poděkování

Pro zpracování disertační práce jsem byl finančně podporován následujícími granty: IGS 2009 (HGF VŠB-TUO), SGS SP/2010149 (MŠMT), Erasmus/LLP (EU), program Mobility (Moravsko-slezský kraj), B/CZ0046/3/0010 (EEA/Norway Grants), CV 5489911 (MŠMT, č. 19/18), CV 5460011 (MŠMT), HS 548 703 a finanční podpora ČKK a ESA.

Zde bych chtěl poděkovat svým kolegům za jejich podporu a shovívavost, především děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Petru Rapantovi, CSc. a doc. Dr. Ing. Jiřímu Horákovi, kteří mě doslova vychovali během mé práce na tomto projektu. Mé díky patří Ing. Markétě Hanzlové, PhD za uvedení do problematiky, doc. RNDr. Pavlu Bláhovi, DrSc. a doc. Ing. Arnoštu Grmelovi, CSc. za nesčetné motivující konzultace a Ing. Michalu Kačmaříkovi a Ing. Evě Jiráňkové, PhD za výtečnou spolupráci. Vždy mi vyšly vstříc kolegyně z ČVUT Praha, Ing. Barbora Knechtlová a Ing. Ivana Hlaváčová, PhD, v mém osobním rozvoji mi pomáhala i doc. Ing. Lena Halounová, CSc. Děkuji, a držím palce Mgr. Pavlu Kadlečikovi, který se rovněž víceméně na vlastní pěst vzdělává v oblasti radarové interferometrie.

Cíle

Hlavním cílem disertační práce je ověření použitelnosti metod družicové radarové interferometrie pro průběžné monitorování poklesů na poddolovaném území Moravskoslezského kraje, v Ostravsko-karvinském revíru (OKR).

Pro monitorování budou využity techniky diferenční interferometrie i multitemporální (vícesnímkové) techniky.

Výsledky budou porovnány s dostupnými nivelačními měřeními vybraných oblastí.

Dále bude zpracován a vyhodnocen experiment s použitím koutových odražečů radarového signálu umožňujících interferometrické zpracování i v méně vhodných lokalitách. Prakticky jimi bude ověřena použitelnost radarové interferometrie pro monitorování sesuvů.

Výstupem disertační práce bude metodika pro monitorování změn reliéfu terénu na území Moravskoslezského kraje.

Obsah

Abstract	3
Motivace	4
Cíle	5
1 Úvod	7
1.1 Zájmové území	7
1.2 Družicová radarová interferometrie	8
1.2.1 Diferenční radarová interferometrie (DInSAR)	9
1.2.2 Vícesnímková radarová interferometrie (MT-InSAR)	9
2 Přehled hlavních výsledků	10
2.1 Pokročilé zpracování interferogramů	10
2.2 Sledování poklesů v OKR	11
2.3 Sledování sesuvu v Doubravě	15
3 Závěr	17
Použitá literatura	18
Vlastní publikace	19

1 Úvod

V rámci disertační práce jsem se soustředil na sledování změn terénu především vlivem hornických činností v Moravskoslezském kraji, vzhledem k tomu, že se jedná o aktuální problém zdejšího regionu. Hornická činnost při dobývání vysoce kvalitního černého uhlí na Ostravsku a Karvinsku má přes 200 let dlouhou historii, která je protkána velkým počtem problémů vzniklých touto činností, ať už se týkají jednotlivých závalů, výronu metanu či poklesů, které způsobují vážná poškození budov a jiných struktur i dnes.

Prostřednictvím družicové radarové interferometrie je možno identifikovat klesající území a vyhodnotit míru poklesů. Kromě toho jsem se zabýval i jejím využitím pro sledování sesuvu na zalesněném kopci v Doubravě.

1.1 Zájmové území

Mocnost slojí v Ostravsko-karvinském revíru (OKR) se pohybuje v rozmezí 0,6-1,8 m na Ostravsku, mocnější sloje o 1,2-6 m se nalézají na Karvinsku. Každým rokem je vytěženo okolo 11 mil. tun černého uhlí. V 90-tých letech 20. století byly ostravské doly postupně uzavřeny. Protože se na Karvinsku většinou dobývá metodou směrného stěnování bez zakládání vydobytych prostor, dochází nad dobývacími prostory a v jejich okolí ke vzniku často poměrně hlubokých poklesových kotlin. To zapříčiňuje významnou členitost terénu, tvorby bezodtokových oblastí i přímo v osídleném území a postupná poškozování mnoha vystavěných objektů, která mnohdy vedou až k jejich úplné destrukci (Jiránková, 2006; Martinec et al., 2004).

Podle poklesového modelu pro 1985-1994 se na Ostravsku udával největší pokles kolem 1 m, zatímco na Karvinsku docházelo k poklesům až 6x větším. Kvůli poklesům byly zrušeny veškeré tramvajové linky v Orlové, zničen Mettenclouitův zámek v 70. letech 20. století, v roce 2004 byl rekonstruován Slezskoostřavský hrad, který poklesl celkově o cca 16 m, kostel sv. Petra z Alkantary v Karvině poklesl od 19. století o více než 37 m (Grmela et al., 2002) atd.

Horninový masiv se stabilizuje po dobu několika let – vzhledem k často velké hloubce dobývání, která přesahuje 1 km pod povrchem může vliv dobývání na terén doznívat i přes 5 let (Dopita et al., 1997). I dnes se vyskytují poklesy půdy v osídlených oblastech, i když v mnohem menší míře. Vytváření podpovrchových volných prostor a jiné změny v horninovém uložení mají za následek i změnu toku podzemních vod. Například se tak po povodních v roce 1997 aktivoval sesuv kopce v Doubravě na okraji jedné z poklesových kotlin Dolu Karviná. Několik obydlených domů bylo následně nutno zdemolovat (Bláha et al., 2009).

1.2 Družicová radarová interferometrie

Principem technik družicové radarové interferometrie (InSAR) pro sledování změn reliéfu terénu je vytvoření takzvaného interferogramu a jeho případná další zpracování. Ten vzniká ze dvou družicových radarových (SAR) snímků určitého území vytvořených s vhodným časovým odstupem a z mírně odlišné polohy družic při snímání, jako rozdíl fázové složky vyslaného a přijatého radarového signálu o určité mikrovlnné délce. Existuje několik družic s různou konfigurací a vlastnostmi - v rámci práce byly použity snímky z ERS, Envisat a Alos Palsar.

Radarovými odražeči jsou objekty alespoň srovnatelné s vlnovou délkou signálu; stejně tak na vlnové délce závisí i schopnost detekce terénní změny - v jedné buňce rozlišení je možno detekovat změnu o velikosti poloviny vlnové délky. Proto je často pro sledování značných změn terénu vhodné použít SAR pracující s delšími vlnami, tedy je preferován Alos Palsar o vlně délky 23.6 cm, která navíc prochází i vegetací. V zastavěných oblastech, kde vegetace nečiní problémy anebo je zapotřebí detekovat velmi malé změny (v přesnosti lepší než 1 mm), se doporučuje použití TerraSAR-X o vlnové délce 3.11 cm a velmi vysokém rozlišení kolem 1 m. Obecně se používají data družic o vlnové délce v radiovém pásmu C, například ERS či Envisat vysílající vlny délky 5.6 cm.

Družicová radarová interferometrie se prakticky používá od 90. let 20. století k tvorbě digitálních modelů terénu, pro sledování poklesů, sesuvů, ledovcových pohybů, vulkanické činnosti, projevů zemětřesení aj. (Hanssen, 2001) Použití je často problematické, neboť se potýká se specifickými problémy, které jsou blíže rozpracovány v disertační práci.

1.2.1 Diferenční radarová interferometrie (DInSAR)

Cílem DInSAR je vytvořit interferogram dokumentující změny reliéfu terénu v čase. Fáze v SAR datech je indukována nejen vlivem změn polohy odrážejících objektů ve směru radarových paprsků během časového rozdílu mezi snímky. Pomocí DInSAR je možno téměř zcela odstranit vliv topografie terénu pomocí digitálního modelu terénu (DEM) a zakřivení Země, systematické chyby, částečně i šum. Pro redukci fázových změn vzniklých průchodem atmosférou se využívají pokročilé metody pro modelování atmosféry. Přesnější z nich však vyžadují vstupní data, která nejsou obvykle dostupná, například data z dostatečně husté sítě GPS stanic ve zkoumané oblasti (Li, 2005).

Výsledný obraz interferogramu zachycuje terénní změny jako rozdíl hodnot fáze vlny mezi pixely, deformace tak tvoří takzvané pruhy "fringe", kde každý pruh lze interpretovat jako deformaci o polovině vlnové délky ve směru k družici či od ní. Pro zhodnocení celkové deformace pro jednotlivé pixely je nutné použít některou z metod rozbalení fáze. Jejich úspěch závisí především na celkové koherenci interferogramu. Šum a jiné chyby se v tomto procesu projeví silně negativně. Při zpracování metodou DInSAR jsem metody rozbalení fáze nepoužíval.

1.2.2 Vícesnímková radarová interferometrie (MT-InSAR)

Vliv některých zdrojů chyb v DInSAR, jako jsou chyby v DEM, orbitech, dekorelující pixely či vliv atmosféry je možné minimalizovat zpracováním více radarových snímků v řadě. Pro vícesnímkové analýzy se používají jen pixely reprezentující stabilně odrážející objekty či uskupení objektů. V těchto vysoce korelujících bodech je často možné spolehlivé rozbalení fáze. Hlavním výsledkem zpracování jsou vyhodnocené deformace pro jednotlivé body vzhledem k časoprostorové referenci. Je možné vyhodnotit deformace v přesnosti lepší než je 1 mm/rok.

Existuje několik hlavních vícesnímkových metod. V rámci disertační práce jsou použity dvě hlavní metody – Persistent Scatterers (PSI) a Small Baselines (SB), obě implementovány v software StaMPS (Hooper, 2008). Oproti metodě PSI, která vyhledává pixely PS obsahující nějaký dominantní odražeč, metoda Small Baselines vybírá pixely, jejichž fáze dekoreluje jen pomalu v celé datové sadě. Proto je tato metoda výhodná v místech bez dominantních odražečů, například mimo urbanizované oblasti. Aby se zvýšila korelace jednotlivých diferenčních interferogramů, kombinuje metoda SB všechny snímky mezi sebou, bez potřeby společného "master" snímku, jak je tomu u metody PSI.

2 Přehled hlavních výsledků

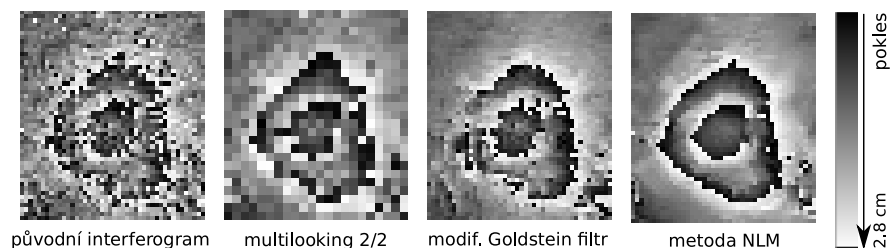
V rámci své práce jsem se věnoval především faktorům limitujícím metodiku DInSAR a MT-InSAR. Omezení jsem identifikoval, prozkoumal a navrhnul možnosti, jak jim předcházet nebo je překonat.

Pro svou práci jsem získal v rámci projektu ESA C1P.4578 k dispozici celkem 143 snímků ERS-1 a ERS-2 (z toho 6 tandemových párů s jednodenním odstupem), 45 snímků Envisat a 7 snímků Alos Palsar. Snímky z ERS a Envisat byly zpracovány dostupnými metodami InSAR, za pomoci software Doris (Kampes et al., 2003) a StaMPS (Hooper, 2006). Data z Alos Palsar byla zaostřena pomocí ROI_PAC a zpracována pouze metodou DInSAR. Dva snímky Alos Palsar byly specificky předzpracovány (zaostřeny metodou Actual Doppler) a musely být interferometricky zpracovány pomocí komerčního software GAMMA (Wegmuller et al., 2004).

2.1 Pokročilé zpracování interferogramů

Kromě klasicky používaných korekčních metod, tak jak byly implementovány v nástrojích Doris, StaMPS či InSAR Toolbox pro Matlab, jsem pro svou práci vyhledal a použil pokročilé metody pro filtraci fázového obrazu - modifikovanou filtrační metodu Goldstein (Baran et al., 2003) a metodu Non-local mean filtering (Deledalle et al., 2010), dále jako NLM. Původní metoda NLM předpokládala jako vstup původní SAR data, které zpracuje a zkombinuje do interferogramu. Značně filtrovaný interferogram je však problematické dále zpracovat (odstranit topografickou a jiné složky), proto jsem metodu modifikoval pro použití již vytvořeného interferogramu jako vstupní data¹. Účinek filtračních metod je demonstrován na Obr. 2.1.1. Zpracovaný interferogram je z dat ERS-2 (23.2.-30.3.1998) z osídleného území Havířova - Dolní Suché, kde byl detekován pokles

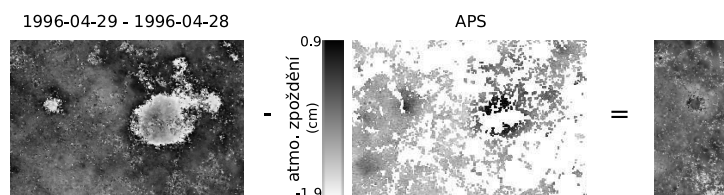
¹modifikována byla jen část s otevřeným zdrojovým kódem, po konzultaci s autorem NLM



Obrázek 2.1.1 – Účinek dostupných filtračních metod DInSAR

o přibližně 6 cm/35 dnů ve směru družicového pohledu (LOS). Území má rozlohu 1.7 km².

Jinou filtrační metodou, kterou jsem prozkoumal, bylo využití modelu fázových vlivů atmosféry z odhadu algoritmů ve StaMPS. Atmosférická složka (APS) může být odhadnuta poměrně spolehlivě pro snímek použitý jako hlavní (master) při vícenímkovém zpracování PSI za předpokladu dostatečného množství dalších použitých snímků. Tyto odhady jsou však aplikovány pouze na fázově stabilní body PS, jejichž hustota často není vysoká. Proto jsem použil pokročilou interpolační metodu `inpaint_nans` pro Matlab². Výsledná filtrace je demonstrována na Obr. 2.1.2. Zlepšení je patrné, APS v oblastech s malým počtem PS bodů však často není modelována správně.

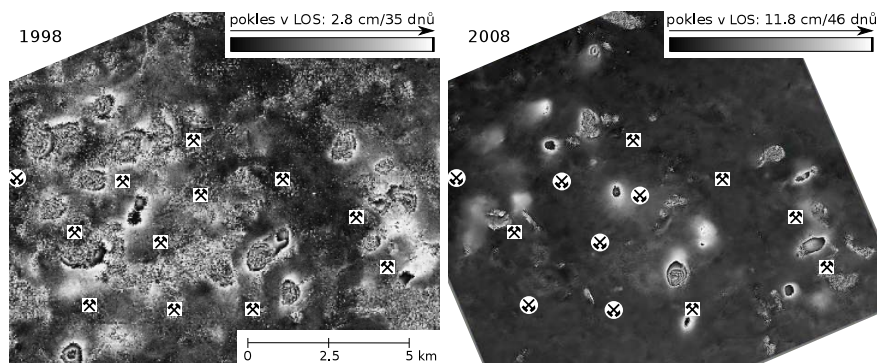


Obrázek 2.1.2 – Redukce atmosférického vlivu v DInSAR pomocí APS

2.2 Sledování poklesů v OKR

Hlavní možnosti InSAR pro sledování poklesů jsou znázorněny na Obr. 2.2.1 zachycující změny na Karvinsku v rozmezí 10 let pomocí DInSAR (filtrováno

²autorem je John D'Errico, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4551>



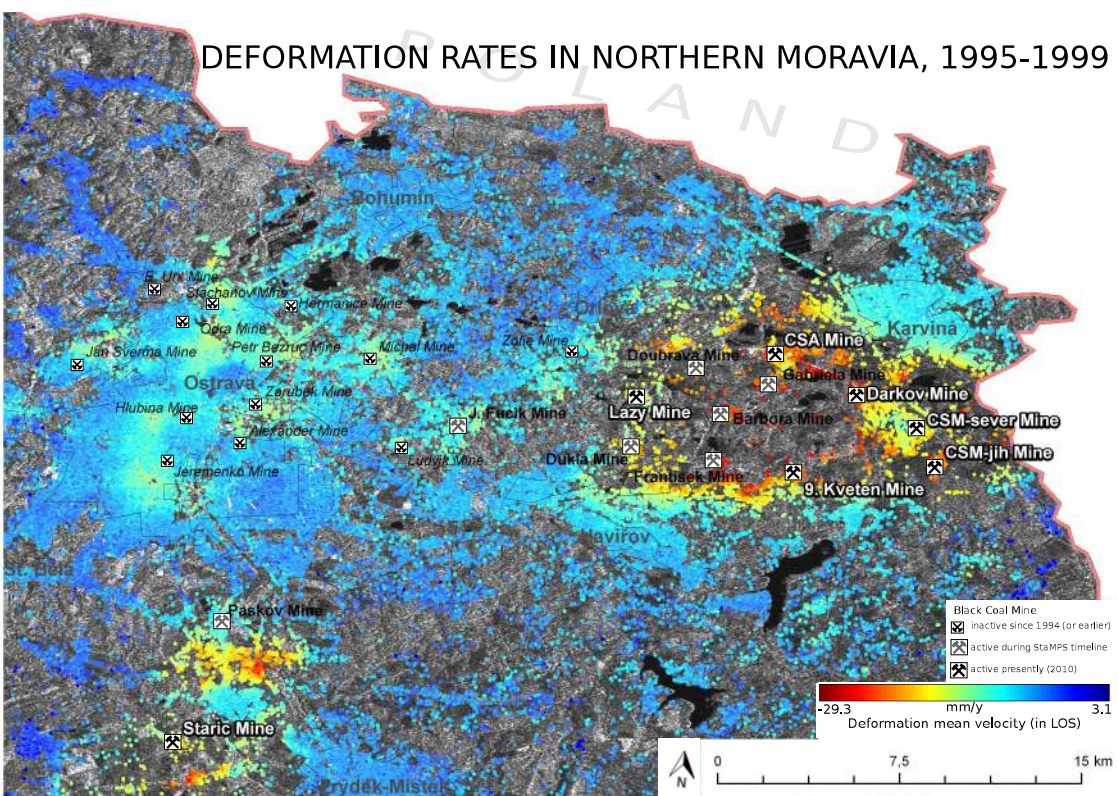
Obrázek 2.2.1 – Poklesové kotliny dolů karvinské části OKR z interferogramů:

- a) ERS-2 23/02/1998 - 30/03/1998 (35 dnů),
- b) Alos Palsar 27/01/2008 - 13/03/2008 (46 dnů)

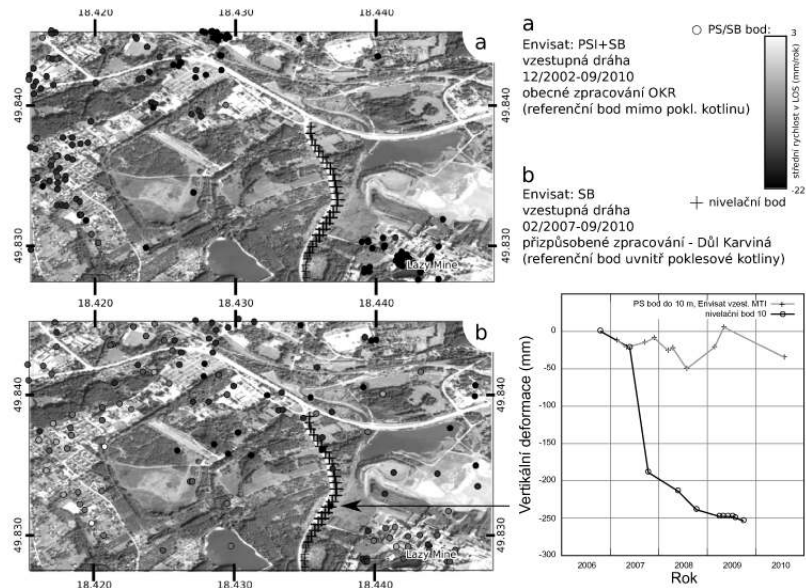
dvěma iteracemi NLM) a na Obr. 2.2.2 vzniklým pomocí kombinovaného MT-InSAR zpracování 21 snímků ERS odhadujícím rychlost poklesů (v LOS) v OKR v průběhu 1995-1999.

Významné zlepšení ve zpracování StaMPS lze pozorovat při správném postupu. Z Obr. 2.2.3 je patrné zvýšení počtu použitých PS bodů mimo zastavěná území a znatelná změna ve vyhodnocení jejich deformační rychlosti při použití přizpůsobených parametrů a vynechání celkově málo koherentních interferogramů a dat ze zimního období či se značným atmosférickým vlivem. Příliš rychlé změny není možné identifikovat pomocí ERS, jak je též demonstrováno tamtéž v grafu srovnání s nivelacemi silnice poblíž dolu Karviná: závod Lazy.

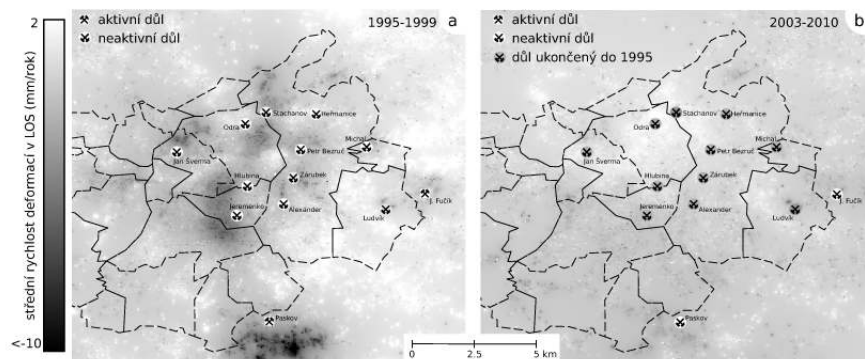
Při použití vhodně předzpracovaných dat a vhodných parametrů ve StaMPS bylo možno získat velmi hustou síť bodů při MT-InSAR na území Ostravy. Byly vyhodnoceny míry poklesů v obdobích 1995-1999 a 2002-2010. Na Obr. 2.2.4 jsou body navíc interpolovány metodou inverzní vzdálenosti (IDW). Pomocí tohoto zpracování byly zjištěny poklesy v místech poblíž uzavřených dolů o rychlosti několika mm/rok, a to v období dávno po uzavření dolů a po uplynutí maximální očekávané doby dozívajícího klesání.



Obrázek 2.2.2 – MT-InSAR zpracování dat ERS z 1995-1999. Doly označené jako současně byly spojeny jako: Důl Karviná (Lazy, ČSA), Důl Darkov (Darkov, 9. Květen) a Důl ČSM.



Obrázek 2.2.3 – Zpracování MT-InSAR dat Envisat pro okolí dolu Karviná (Lazy):
a) obecné, 2005-2010, b) přizpůsobené, 2007-2010, c) poklesová
křivka z měření nivelací (černá) a blízkého PS bodu (šedá).
Podkladová data: © 2009 Google EarthTM



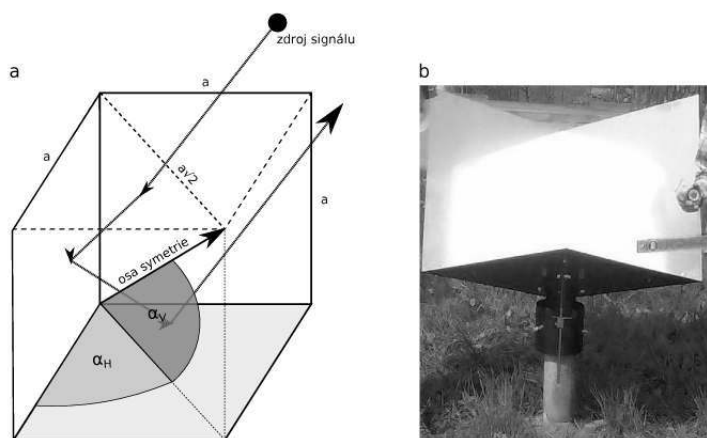
Obrázek 2.2.4 – Interpolované zpracování oblasti Ostrava pomocí MT-InSAR:
a) ERS 08/1995-06/1999; b) Envisat 12/2002-09/2010

2.3 Sledování sesuvu v Doubravě

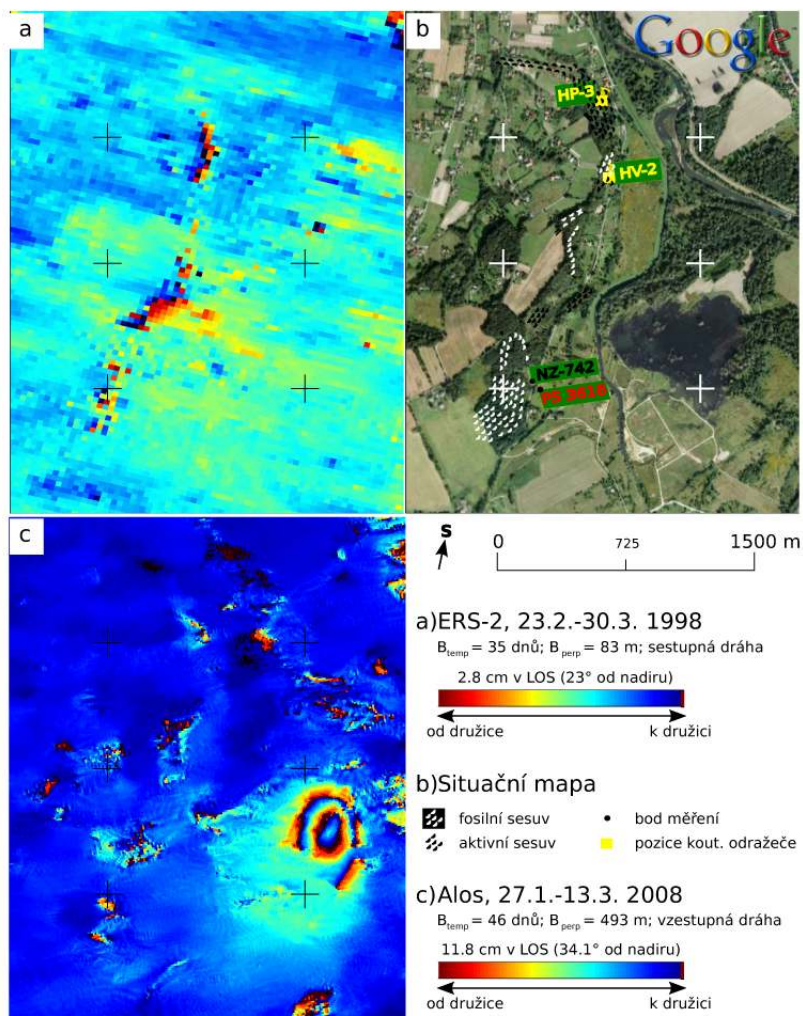
Sesuv doubravského kopce byl vyhodnocen pomocí několika diferenčních interferogramů, ve kterých byla identifikována místa podezřelá z deformací, která odpovídala sledovaným místům sesuvu, jak je patrné z Obr. 2.3.2. Sesouvající území je však hustě zalesněno, což prakticky znemožňuje kvalitní výsledky z InSAR. Sesuv nebylo možné vyhodnotit pomocí vícesnímkových metod.

Koutový odražeč

Dominantní odraz koutového odražeče (KO) by měl zajistit fázovou stabilitu pixelu a umožnit tak PSI zpracování v oblastech s absencí vhodných odražečů, například na zalesněném doubravském kopci. Navržený KO by měl při správné orientaci mít dostatečný radarový průřez 37 dB pro Envisat. Tři KO byly vyhotoveny (viz Obr. 2.3.1) a připraveny k použití v lokalitách sesuvu označených na Obr. 2.3.2b jako HP-3 a HV-2. Bohužel byl pro výpočet orientačních úhlů KO vzhledem k družici použit nevhodný postup, jehož důsledkem společně s méně přesnou montáží před každým průletem a dalšími uvedenými faktory byl neúspěch praktického použití odražečů. Postup pro již správné použití KO v navazujících projektech byl navržen.



Obrázek 2.3.1 – Návrh koutového odražeče (a) a jeho instalace v terénu (b)



Obrázek 2.3.2 – Vybrané interferogramy demonstrující doubravský sesuv.
 Podkladová data: © 2009 Google EarthTM

3 Závěr

Práce seznamuje s principy, možnostmi i omezeními technik InSAR a s dostupnými prostředky pro zpracování, s existujícími družicemi SAR, vyhodnocuje jejich vhodnost použití a uvádí vliv různých chybových faktorů na data vybraných jednotlivých družic. Dále uvádí postupy a výsledky ze zpracování dat popisující deformační pohyby v terénu celého OKR a ve vybraných lokalitách, včetně sesuvu v Doubravě, pro jehož pokročilé sledování byly vytvořeny tři koutové odražeče radarového signálu. V závěru práce je doporučena metodika pro soustavné sledování terénních změn na území Moravskoslezského kraje pomocí InSAR.

Ve zkoumaném území se projevují rychlé poklesy, které mohou přesáhnout míru 1 m/rok v poměrně malé ploše (o průměru stovek metrů). Takové poklesy není možno korektně vyhodnotit pomocí družic ERS či Envisat, použití jejich dat je proto omezeno pouze na detekci těchto poklesů, například pro zjištění hranic poklesové kotliny. Tato data se však jeví velmi vhodná pro sledování doznívajících poklesů po ukončení hornické činnosti, nejlépe pomocí vícesnímkových technik InSAR, kde je možné přesně vyhodnotit poklesy o rychlosti prvních centimetrů za rok; teoretická spodní hranice se udává až méně než 1 milimetr za rok. Tak byly zjištěny velmi malé lokální zbytkové poklesy na území Ostravy až více než 15 let po ukončení těžby tamějších dolů pomocí implementace ve StaMPS.

Ze srovnání výsledků zpracování StaMPS s nivelačními daty vyplynuly významné nepřesnosti - ty byly způsobeny především právě detekčními omezeními radaru z ERS/Envisat. Nivelační data se týkala vždy silně klesajícího území.

Zpracování dat z družice Alos Palsar technikou diferenciální InSAR prokázalo nesporné výhody radaru o vyšším rozlišení a nižší frekvenci pro monitorování hlubokých poklesů a pro použití v územích pokrytých středně hustou vegetací. Bohužel z důvodu nedostatku takových dat pro sledované území nebylo možné na ně aplikovat vícesnímkové techniky InSAR.

Ačkoli není doporučeno nahradit metodami InSAR nivelační či jiná měření poklesů, ukázala se tato technologie velmi vhodnou pro průběžné sledování terénních změn v OKR, především v kombinaci s vhodnými daty.

Použitá literatura

- Baran, I., M. P. Stewart, B. M. Kampes, Z. Perski, and P. Lilly. "A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter". In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03*. Vol. 41. 9. Toulouse: IEEE International, 2003, pp. 2114–2118.
- Bláha, P., R. Duras, P. Konečný, and H. Doleželová. *Antropogenní změny z poddolování a svahové deformace*. Tech. rep. Final report of project ČGS 2549/2006. Ostrava: GEOtest Brno, 2009, p. 186.
- Deledalle, Ch. A., F. Tupin, and L. Denis. "A non-local approach for SAR and interferometric SAR denoising". In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'10*. Honolulu: IEEE International, 2010. ISBN: 978-1-4244-9564-1.
- Dopita, M., J. Aust, et al. *Geologie české části hornoslezské pánve (Geology of the Czech part of the Upper Silesian Basin)*. Geological Map of Paleozoic of the Czech part of the Upper Silesian Basin 1:100 000 included. Ministry of Environment of the Czech Republic, Prague, 1997, p. 280. ISBN: 80-7121-011-5.
- Grmela, A. and N. Rapantová. "Protection of Groundwater resources quality and quantity in mining areas". In: *Deposit and Geoenvironmental Models for Resource Exploitation and Environmental Security* (2002), pp. 358–397.
- Hanssen, R. F. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, p. 328. ISBN: 0-7923-6945-9.
- Hooper, A. "A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches". In: *Geophysical Research Letters* 35 (2008). ISSN: 0094-8276. DOI: 10.1029/2008GL034654.
- "Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation". PhD thesis. Stanford University, 2006.
- Jiráňková, E. "Časoprostorové vytváření poklesové kotliny v závislosti na charakteru horského masivu". PhD thesis. Ostrava: VSB-TUO, 2006. URL: <http://hdl.handle.net/10084/76752>.
- Kampes, B. M., R. F. Hanssen, and Z. Perski. "Radar interferometry with public domain tools". In: *Fringe Workshop*. Frascati: ESA, 2003, p. 6.

- Li, Z. "Correction of atmospheric water vapour effects on repeat-pass SAR interferometry using GPS, MODIS and MERIS Data". PhD thesis. University College London, 2005.
- Martinec, P. and B. Schejbalová. "History and environmental impact of mining in the Ostrava - Karviná coal field (Upper Silesian coal basin, Czech Republic)". In: *Geologica Belgica*. Proceedings of the 5th European Coal Conference 7.3-4 (2004), pp. 215–224.
- Wegmuller, U., C. Werner, T. Strozzi, and A. Wiesmann. "Monitoring mining induced surface deformation". In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International*. Vol. 3. IEEE. 2004, pp. 1933–1935.

Vlastní publikace

(chronologicky)

Hanzlová, M., Lazecký, M., Rapant, P., Böhmová, D., Jiráňková, E. "Radarová interferometrie při vyhodnocování poklesů vlivem poddolování (poster)", In: *17. konference GIS ESRI v ČR*, 23.- 24.10.2008, Praha.

Lazecký M. "Detection of land subsidence due to mining activities in Northern Moravia region using satellite radar interferometry". In: *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Serie Górnictwo* 287.1814 (2009), pp. 135-140, Gliwice. ISSN: 0372-9508.

Lazecký M. "InSAR used for subsidence monitoring of mining area OKR, Czech republic". In: *Fringe Workshop*. Frascati: ESA, 2009. CD-ROM, 3 pp. ISBN: 978-92-9221-241-4 ISSN: 1609-042X.

Lazecký M., Jiráňková E., Böhmová D. "Usage of InSAR techniques to detect and monitor terrain subsidence due to the mining activities". In: *Geo-Science Engineering*, Vol. LVI.4 (2010), pp. 32-49. ISSN: 1802-5420. Online: <http://gse.vsb.cz/2010/LVI-2010-4-32-49.pdf>.

Lazecký M. "InSAR used for subsidence monitoring of mining area OKR, Czech republic". In: *Proceedings - Symposium GIS Ostrava 2010*, Ostrava, 2010, CD-ROM. 3 pp. ISBN: 978-80-248-2171-9.

Lazecký M. "Monitoring of subsidence of mining area in Northern Moravia by radar interferometry techniques". In: *Proceedings of Topical Issues of Subsoil Usage*, Sankt Peterburg, 2010, pp. 77-79. ISBN: 978-5-94211-447-3.

Bláha, P., Černý, V., Duras, R., Fousek, J., Horský, O., Lazecký, M., Oprchal, J., Tábořík, P., Peshawa, A., Aziz, B.Q. "Geoelectrical Surveys for the Feasibility Study of the Bawanur Dam Site". In: *Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*. Vol. XVII.2 (2010), pp. 14-48 (35 p.), CD-ROM. ISSN: 1803-1447.

Lazecký M., Jiráňková E., Böhmová D. "Monitoring of fast subsidence in a mining area of Northern Moravia, Czech Republic". In: *Proceedings of ESA Living Planet Symposium 2010*, 28.6-2.7.2010, Bergen, CD-ROM. ISBN: 978-92-92221-250-6 ISSN: 1609-042X.

Lazecký M., Jiráňková E. "Longtime monitoring of mine subsidence in Northern Moravia, Czech Republic using different InSAR techniques". In: *Proceedings of the 2010 IGARSS*, 25-30th July 2010, Honolulu, pp. 3331-3334. ISBN: 978-1-4244-9564-1.

Lazecký, M. "Družicové monitorování poklesů půdy – radarová interferometrie". In: *Těžba a úprava surovin III*, 15.12.2010, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010. ISBN: 978-80-248-2365-2.

Lazecký, M., Kačmařík, M. "Measurement of landslides in Doubrava using radar interferometry". In: *Proceedings of GIS Ostrava 2011*, 24.-26.1.2011, Ostrava: VŠB-TUO, 2011. ISBN: 978-80-248-2366-9.